第 37 卷第 22 期
2017 年 11 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.22
Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201609101837
唐呈瑞, 逯承鹏,杨青, 姜璐, 任婉侠, 薛冰.东北老工业区生态安全动态演变过程及驱动力.生态学报,2017,37(22):7474-7482.
Tang C R, Lu C P, Yang Q, Jiang L, Ren W X, Xue B.Dynamic evolution and driving forces of ecological security in the Traditional Industrial Area of northeastern China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(22):7474-7482.

东北老工业区生态安全动态演变过程及驱动力

唐呈瑞[1,2], 逯承鹏[1,2,*],杨　青[1,3], 姜　璐[4], 任婉侠[1,2], 薛　冰[1,2]
1 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳　110016
2 辽宁省环境计算与可持续发展重点实验室, 沈阳　110016
3 中国科学院大学, 北京　100049
4 兰州大学资源环境学院, 兰州　730000

摘要:生态安全与国防安全、经济安全、金融安全等已具有同等重要的战略地位,并成为未来经济社会安全的主要约束。东北老工业区作为我国重要的老工业基地及粮食生产基地,其生态安全状况关系着中国可持续发展战略的实施。采用能值-生态足迹模型,对东北老工业区 2000—2014 年生态安全动态演变过程进行时间序列的定量分析,并采用主成分分析方法分析其驱动力。结果表明:研究期内,人均能值生态承载力从 0.66 hm^2/人下降到 0.64 hm^2/人,人均能值生态足迹由 10.58 hm^2/人增加到 19.85 hm^2/人,处于生态赤字状态,且赤字增大趋势明显;生态压力指数与生态安全等级均不断增大,生态安全状况呈恶化趋势,生态安全问题亟待解决,而这是由社会经济、人口状况、资源环境、技术水平及土地利用程度等因素共同驱动的结果。最后,提出了改善东北老工业区生态安全状况的对策建议。

关键词:生态安全;能值-生态足迹模型;演变过程;驱动因子;东北老工业区

Dynamic evolution and driving forces of ecological security in the Traditional Industrial Area of northeastern China

TANG Chengrui[1,2], LU Chengpeng[1,2,*], YANG Qing[1,3], JIANG Lu[4], REN Wanxia[1,2], XUE Bing[1,2]
1 *Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang* 110016, *China*
2 *Key Laboratory for Environment Computation and Sustainability of Liaoning Province, Shenyang* 110016, *China*
3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
4 *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*

Abstract: Ecological security is as important as national, economic, and financial security and has become the main constraint of future socio-economic security. The Traditional Industrial Area of northeastern China is an important traditional industrial and grain production base of China, and its ecological security is related to the implementation of sustainable development strategies. Based on the emergy-ecological footprint model, the ecological security in Traditional Industrial Area of northeastern China was quantitatively evaluated from 2000 to 2014, followed by a scenario analysis on the driving forces of the ecological security using a principal component analysis method. The results showed that, the value of emergy ecological-capacity per capita decreased from 0.66 to 0.64 hm^2/cap, whereas the emergy-ecological footprint increased from 10.58 to 19.85 hm^2/cap, which indicated that an ecological deficit existed in the Traditional Industrial Area of northeastern China. The ecological pressure in this area increased, showing an unsustainable development trend from 2000 to 2014. The ecological pressure index and ecological security levels gradually increasing, ecological security situation is deteriorating,

基金项目:国家自然科学基金(41471116,71303230);中国科学院青年创新促进会(2016181);辽宁省自然科学基金 (201602743,20170540898);辽宁省博士科研启动基金(201501037);四川省社会科学重点研究基地——四川循环经济研究中心项目(XHJJ-1505, XHJJ-1611)
收稿日期:2016-09-10;　　**修订日期**:2017-01-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luchp@ iae.ac.cn

ecological security issues to be urgent resolved. The ecological stress tended to be serious as a result of a combination of several factors, such as social, economic, population, resource, environmental, technological level, and land use degree. Finally, effective management strategies and suggestions to improve the ecological security of the Traditional Industrial Area of northeastern China were proposed.

Key Words: ecological security; emergy-ecological footprint model; dynamic evolution; driving factors; Traditional Industrial Area of northeastern China

生态安全是指国家或者地区拥有能够持续满足社会进步和经济发展的生态资源且社会经济发展过程中较少受到生态环境制约的环境[1]。随着全球变化和人类活动影响的加剧,生态安全研究正发生着深刻变化,呈现出多目标、多层次、多学科交叉综合的复杂特点[2-3],研究主题日益丰富[4],已成为生态学、环境科学、地理学和经济学等学科的研究热点之一[5]。国外对生态安全的研究多集中在概念辨析、理念形成、对国家、民族发展的重要意义以及结合区域可持续发展在全球或者国家层面研究国家安全和社会安全[6-7],如气候变化对全球粮食安全影响[8],水环境安全评价[9]、区域生态安全[10-11]等。国内则以生态安全基础理论[4,12]和综合评价研究[13-16]为主,重点开展城市尺度的生态安全研究[17-20],还有学者结合地理信息系统综合评价流域生态安全状况[1]。上述研究成果在生态安全研究中发挥了重要作用,但生态安全研究领域中的许多重要问题,比如区域生态安全动态演变过程及其驱动力等还需进一步分析与探讨[21-22]。

东北老工业区作为我国重要的老工业基地以及粮食生产基地,其生态安全状况关系着中国可持续发展战略的实施。研究表明能值-生态足迹模型通过引入能值密度的概念,将系统中能量流换算成对应的生物生产性土地面积,其计算结果较传统生态足迹模型能够更真实的反应区域的生态安全状况,克服了传统生态足迹模型存在的部分缺陷[23]。因此,本文采用能值-生态足迹分析模型,对东北老工业区 2000—2014 年的生态承载力和生态足迹进行核算,分析其时间序列的动态变化过程与基本特征,并建立生态安全评价体系,选择生态赤字/盈余、生态压力指数、生态足迹多样性指数和生态协调系数等指标,对其生态安全状况进行评估和分析,阐明其动态演变过程。在此基础上,采用主成分分析方法揭示其驱动力,以期为全面振兴东北及东北地区生态文明建设宏观决策提供科学依据。

1　研究方法

1.1　能值-生态足迹模型

生态足迹理论由加拿大经济学家 Rees[24]提出,Wackemagel[25]于 1996 年进行了完善,该理论从生态安全角度出发将人类占用的不同类型自然资源与排放的废弃物转换为统一的数量指标,即地球平均生产力的生物生产性土地面积,并与自然界实际提供的土地面积进行比较,以衡量地区可持续发展的潜力[26-27]。能值生态足迹将能值分析法[28]和生态足迹法结合,引入生态系统的外部性因素,结合能值转换率和能值密度定量化研究可持续发展[29]。近年来,该方法逐步得到了不同程度的改进,如进一步细化生态足迹指标体系、加大生物多样性比重、结合净初层次生产力来计算能值转换率等[30-32],并广泛用于城市、区域、国家尺度的生态安全研究领域。该方法融合了原生态足迹的优点,并具有全面性、系统性、准确性、客观性、可持续性和定量性的特点,计算结果也能更真实地反映区域的生态安全状况[33]。

1.1.1　人均能值生态承载力

能值生态承载力的计算主要考虑太阳辐射能、风能、雨水化学能、雨水势能和地球旋转能这 5 种可更新资源的能值。由于风能、雨水势能和雨水化学能均是太阳光在能量流动中的转化形式,为了避免重复计算,根据能值理论,在同一性质的能量中,只选取其中的最大值。因此,可更新资源的总能值等于前 4 种能值的最大值加上地球旋转能的能值。最后,将计算出的人均能值生态承载力减去 12%的用于保护生物多样性用地之后

则得到实际可供人类利用的人均能值生态承载力。能值生态承载力的计算公式为:

$$EC = N \times ec = N \times e/p \tag{1}$$

式中,EC 为能值生态承载力(hm^2);N 为人口数,ec 为人均能值生态承载力(hm^2/人);e 为可更新资源的人均太阳能值(sej/人);p 为区域平均能值密度(sej/hm^2),为区域可更新资源总能值与区域土地面积的比值。

1.1.2 人均能值生态足迹

能值生态足迹的计算公式为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^{n} (c_i/p) \tag{2}$$

式中,EF 为能值生态足迹(hm^2),N 为人口数,ef 为人均能值生态足迹(hm^2/人);c_i 为第 i 种资源的人均能值(单位:sej/人);p 为区域平均能值密度(单位:sej/hm^2)。

1.2 生态安全评价指标

1.2.1 人均能值生态赤字/盈余

能值生态赤字/盈余的计算公式为:

$$ED = EC - EF = N \times ed = N \times (ec - ef) \tag{3}$$

式中,ED 为能值生态赤字/盈余(hm^2),ed 为人均能值生态赤字/盈余(hm^2/人)。

当 ed 为负时,表示人均能值生态承载力供给小于需求,称之为生态赤字;ed 为正时,表示人均能值生态承载力的供给大于需求,即为生态盈余。ed 为零时,表示人均能值生态承载力供给等于需求,处于生态平衡状态。

1.2.2 生态压力指数

生态压力指数,又称为生态足迹强度指数,指一个国家或地区单位生态承载面积上的生态足迹[34]。该指数代表了一个区域环境所承受压力的程度。其计算公式为:

$$\mathrm{EFI} = EF/EC \tag{4}$$

式中,EFI 为生态压力指数,EF 为能值生态足迹,EC 为能值生态承载力。当 $EF>0$ 且 $EC>0$,$0<\mathrm{EFI}<1$,即 $EF<EC$ 时,生态资源的供给大于需求,区域承受的压力小,区域处于生态安全状态;当 $\mathrm{EFI}>1$,即 $EF>EC$ 时,单位生态承载面积所要承受的压力大于其支撑能力,即生态资源处于供小于需求,则该地区的生态安全受到威胁,且 EFI 与 1 相差越大,生态不安全程度就越大。根据生态压力指数值范围可以划分生态安全等级与生态安全预警等级(表 1),从而直观反映区域生态安全状态[35]。

表 1 生态安全等级和生态安全预警划分

Table 1 The division of ecological security level and alarm

生态安全等级 Ecological security level	程度 Level	生态压力指数值范围 The range of EFI	生态安全预警等级 Ecological security alarm level	程度 Level	生态压力指数值范围 The range of EFI
1	安全	0—1.0	0	无警	0—10.0
2	较安全	1.0—10.0	1	轻警	10—18.0
3	轻度不安全	10.0—18.0	2	中警	18.0—24.0
4	中度不安全	18.0—24.0	3	重警	24.0—30.0
5	重度不安全	24.0—30.0	4	巨警	30.0 及以上
6	极度不安全	30.0 及以上			

1.2.3 生态协调系数

生态协调系数表示一个地区经济社会发展状况与当地生态环境的协调性,其计算公式为:

$$D_S = (ef + ec)/\sqrt{ef^2 + ec^2} = \left(\frac{ef}{ec} + 1\right)/\sqrt{\left(\frac{ef}{ec}\right)^2 + 1} = (\mathrm{EFI} + 1)/\sqrt{\mathrm{EFI}^2 + 1} \tag{5}$$

式中,D_S为区域人均生态协调系数,ef 为本地人均能值生态足迹,ec 为人均能值生态承载力。由于 ef、ec 均大

于 0,故 $1<D_S \leq 1.414$。当 D_S 越接近 1 时,表示区域的生态协调性越差;当 D_S 越接近 1.414 时,则表明区域生态协调性越好;当 $D_S = 1.414$ 时,区域生态需求和供给达到平衡,表明区域的生态协调性达到最佳状态。

1.2.4 生态足迹多样性指数和生态经济系统发展能力

生态足迹多样性指数反映区域不同土地类型利用的丰裕度和生态足迹分配的公平度,生态经济系统中生态足迹的分配越接近平等,对给定系统组分的生态经济来说,生态多样性就越高。生态经济系统发展能力是由生态足迹乘以生态足迹多样性指数得到,区域经济生态系统发展能力的提高在一定程度上依赖于生态足迹多样性的提高。生态足迹多样性指数与生态经济系统发展能力计算公式为:

$$H = - \sum (P_i \ln P_i) \tag{6}$$

$$C = EF \times H \tag{7}$$

式中,H 为多样性指数,P_i 为第 i 类生产性土地在区域生态足迹中所在的比例。C 为生态经济系统发展能力,EF 为地区生态足迹。

2 结果与分析

按照上述方法对东北老工业区人均能值承载力、人均能值生态足迹和生态安全评价指标进行计算,计算结果见表 2。数据来源于《中国统计年鉴(2001—2015)》、《辽宁省统计年鉴(2001—2015)》、《黑龙江省统计年鉴(2001—2015)》、《吉林省统计年鉴(2001—2015)》、国家数据(http://date.stats.gov.cn)和数析网(http://www.tjsql.com)等。可更新资源的太阳能值转化率、能量折算系数、能值转换率等模型参数及相关计算过程见参考文献[36-38]。

表 2　人均能值承载力、人均能值生态足迹和生态安全评价指标计算结果

Table 2　The results of per capita emergy ecological capacity, per capita emergy ecological footprint and ecological security evaluation index

年份 Year	人均能值生态承载力 Per capita emergy ecological capacity/(hm²/人)	人均能值生态足迹 Per capita emergy ecological footprint/(hm²/人)	人均生态赤字 Ecological deficit/(hm²/人)	生态压力指数 EFI	生态足迹多样性指数 Ecological footprint	发展能力 Development capacity	生态协调系数 D_S
2000	0.6565	10.5748	−9.9183	16.1081	1.3269	14.0313	1.0600
2001	0.6553	10.9796	−10.3243	16.7546	1.3460	14.7786	1.0578
2002	0.6539	10.9392	−10.2852	16.7286	1.3511	14.7804	1.0579
2003	0.6529	11.8428	−11.1899	18.1401	1.3567	16.0669	1.0535
2004	0.6519	13.6205	−12.9686	20.8936	1.3397	18.2470	1.0467
2005	0.6502	13.9196	−13.2694	21.4082	1.3464	18.7407	1.0456
2006	0.6481	16.4466	−15.7984	25.3759	1.3037	21.4419	1.0386
2007	0.6458	16.1792	−15.5334	25.0540	1.3088	21.1747	1.0391
2008	0.6440	16.9717	−16.3278	26.3542	1.3431	22.7951	1.0372
2009	0.6428	15.5049	−14.8621	24.1209	1.3079	20.2783	1.0406
2010	0.6424	15.2519	−14.6095	23.7436	1.2749	19.4451	1.0412
2011	0.6423	19.8784	−19.2361	30.9491	1.2520	24.8875	1.0318
2012	0.6444	16.4220	−15.7776	25.4846	1.2639	20.7556	1.0384
2013	0.6461	17.0262	−16.3801	26.3516	1.2660	21.5554	1.0372
2014	0.6463	19.0636	−18.4173	29.4967	1.2952	24.6903	1.0333

2.1 人均能值生态承载力

由图 1—2 可知,2000—2014 年东北老工业区人均能值生态承载力在 0.64 hm^2/人到 0.66 hm^2/人之间波动变化,平均值为 0.65 hm^2/人,最大值为 2000 年的 0.66 hm^2/人,最小值为 2011 年的 0.64 hm^2/人,但总体呈

现下降趋势。2009 年以前,由于总人口增加以及日益加剧的人类活动造成的环境污染和生态破坏会造成生态承载力的持续下降;2009—2011 年下降趋于平缓;2012 年以后,可更新资源总能值提高及总人口数量下降,导致人均能值生态承载力有所上升,同时,由于自然环境的自我调节能力使得生态承载力在一定范围内逐步恢复。

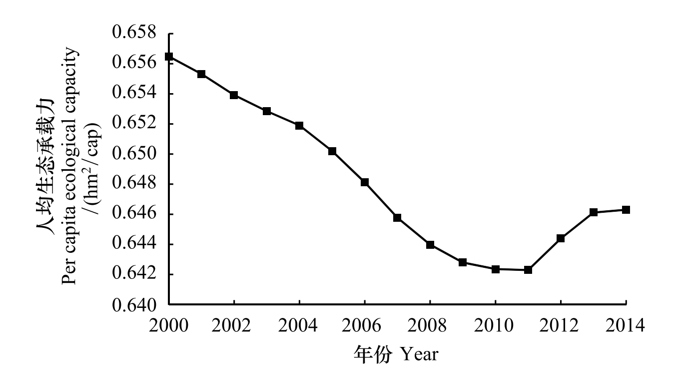


图 1 东北老工业区 2000—2014 年人均能值生态承载力

Fig.1 Per capita emergy ecological capacity of the Traditional Industrial Area in northeastern China from 2000 to 2014

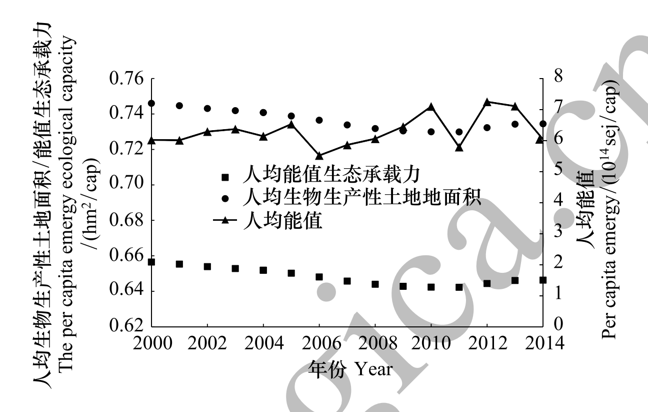


图 2 东北老工业区 2000—2014 年可更新资源的人均太阳能值和人均能值生态承载力

Fig.2 Renewable resources' per capita emergy and the per capita emergy ecological capacity of the Traditional Industrial Area in northeastern China from 2000 to 2014

2.2 人均能值生态足迹

由图 3 可知,2000—2014 年东北老工业区人均生态足迹总体上呈上升趋势,最小值为 2002 年的 10.94 hm^2/人,最大值为 2011 年的 19.88 hm^2/人,年均增长量为 0.61 hm^2/人。由图 4 可知,2000—2008 年各类生物生产性土地能值生态足迹大小顺序依次为化石燃料用地 > 耕地 > 建筑用地 > 牧草地 > 水域 > 林产品,其余年份为化石燃料用地 > 耕地 > 牧草地 > 建筑用地 > 水域 > 林产品;化石燃料用地的能值生态足迹变化对人均能值生态足迹变化贡献最大,其净增加值为 4.95 hm^2/人,占人均能值生态足迹总增加值的 58.28%,主要是由于工厂所用燃煤的不断增加、家用汽车所用汽油柴油增加以及天然气的普及等,导致化石能源消耗量不断增多;建筑用地、耕地次之,净增加值分别为 1.32 hm^2/人、1.20 hm^2/人,分别占人均能值生态足迹总增加值的 15.57% 和 14.12%,主要是由于人类购买力及消费水平的提高,导致对居住、道路、水电等基础设施和对农产品的需求不断增加;林产品的贡献最小,为 0.78%;牧草地和水域的贡献值分别为 8.59% 和 2.66%。

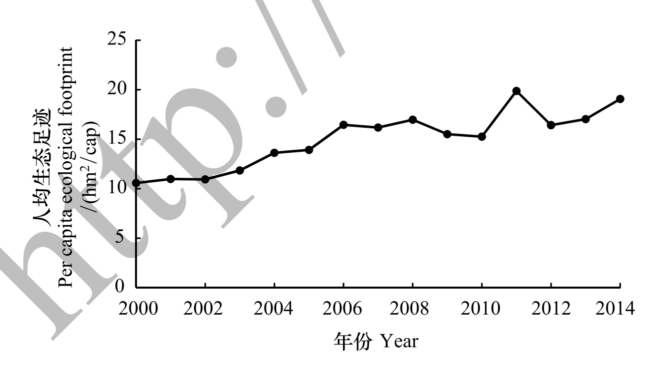


图 3 东北三省老工业基地 2000—2014 年人均能值生态足迹

Fig.3 Per capita emergy ecological footprint of Northeast old industrial base from 2000 to 2014

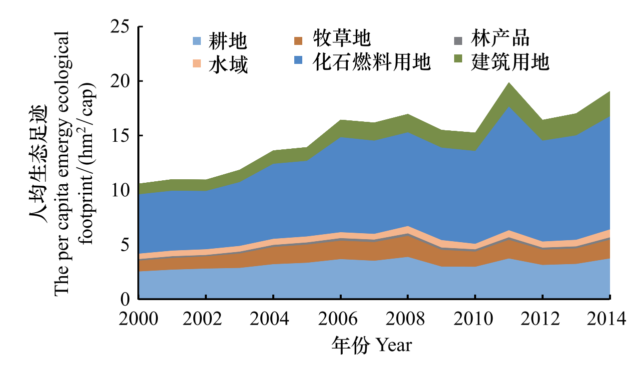


图 4 东北老工业区 2000—2014 年各生产及消费项目的人均能值生态足迹

Fig. 4 Production and consumer items' per capita emergy ecological footprint of the Traditional Industrial Area in northeastern China from 2000 to 2014

2.3　生态安全评价

2.3.1　人均生态赤字/盈余及生态压力指数分析

由图 5 可知,研究期内东北老工业区处于人均生态赤字状态,且赤字大体上呈现增长趋势;人均生态赤字由 2009 年的最低值-9.92 hm^2/人增加到 2011 年的最高值-19.24 hm^2/人;其中 2004 年、2006 年、2011 年、2014 年赤字增长率较高,分别为 15.90%、19.06%、31.67%、12.44%;说明人类活动对资源环境的消耗越来越大。生态压力指数较大,表明生态环境承受的压力较大,供需关系严重不平衡,生态安全长期受到威胁且不安全程度较大。

2.3.2　生态足迹多样性指数和发展能力分析

由图 5 可知, 2000—2014 年生态足迹多样性指数变化量较小,大部分在 1.25—1.36 之间,最大值(1.36)和最小值(1.25)分别出现在在 2003 年和 2011 年,2008 年以后多样性减少,应适当调整生态足迹的分配。发展能力整体呈上升趋势,在 2011 年时达到最大值,且其整体趋势与生态足迹整体趋势基本相同,说明发展能力的提升主要是生态足迹增加的贡献。

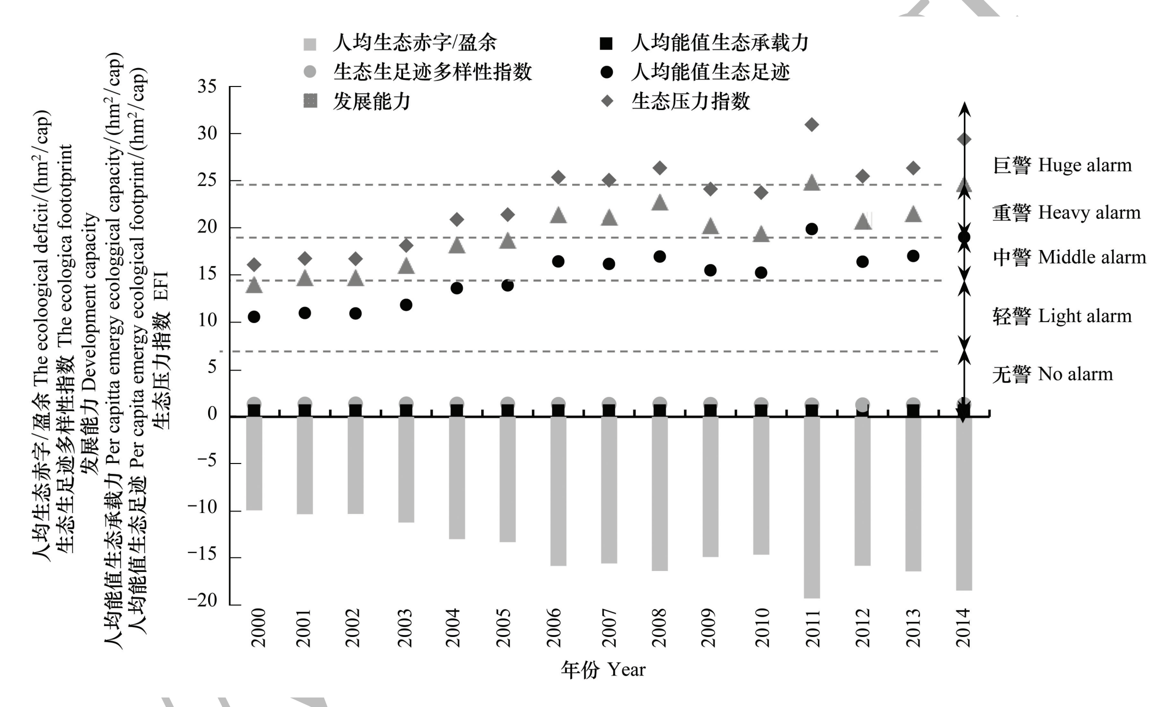


图 5　东北老工业区 2000—2014 年生态安全评价指标计算结果

Fig.5　The results of ecological security assessment index of the Traditional Industrial Area in northeastern China from 2000 to 2014

2.3.3　生态压力指数和生态协调系数分析

由图 6 可知,生态协调性指数 D_S 随着生态压力指数的增加而降低,并且生态协调性指数 D_S 不断降低并趋近于 1,表明区域区生态环境协调性较差,需要采取积极措施以提升高生态环境协调性。

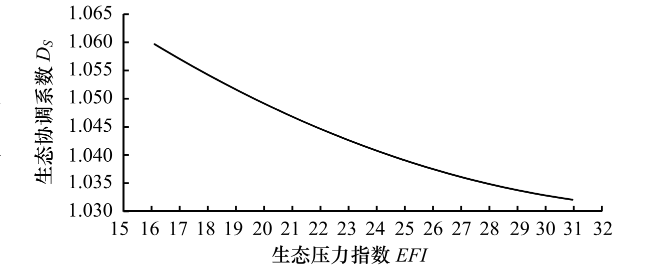


图 6　东北老工业区 2000—2014 年生态压力指数 EFI 和生态协调性系数 D_S 的定量关系

Fig.6　The quantitative relationship of EFI and D_S of Northeast old industrial base from 2000 to 2014

2.4　生态安全驱动力分析

采用主成份分析方法,结合 SPSS 软件,选取人口、经济、资源环境、技术和土地利用情况共计 11 项指标(表 3),以 2001—2014 年的时间序列数据为样本,对生态安全驱动力进行分析,计算结果见表 4 和表 5。按照相关矩阵特征值大于 1 以及各主成分累计贡献率大于

85%的原则,第一、二主成分(F1、F2)可以代替全部信息,第一主成分的特征值为8.406,其贡献率为76.414%,第一主成分除复种指数与工业贡献率以外,其他因子都具有很大的载荷,表现出极强的正相关或负相关,这些变量几乎包含了所有五个方面的状况,综合性很强。第二主成分的特征值为1.262,其贡献率为11.469%,第二主成分只是在工业贡献率上具有较大的载荷,在一定程度上代表着经济结构对生态安全的影响。

表3 驱动因子指标

Table 3 Driving factor index

准则 Rule	指标 Index	准则 Rule	指标 Index
人口状况	总人口数、城镇人口比重	技术状况	万元GDP能耗、农用机械总动力
经济水平	人均GDP、工业贡献率、居民消费水平	土地利用程度	复种指数、建设用地
资源环境	耕地农用化肥折纯量、人均耕地面积		

表4 方差分解主成分提取分析

Table 4 Total Variance Explained

成分 Component	特征值 Total	贡献率/% Variances	累计贡献率/% Cumulative	成分 Component	特征值 Total	贡献率/% Variances	累计贡献率/% Cumulative
1	8.406	76.414	76.414	7	0.035	0.316	99.846
2	1.262	11.469	87.883	8	0.010	0.090	99.936
3	0.597	5.427	93.310	9	0.003	0.051	99.987
4	0.517	4.696	98.007	10	0.001	0.009	99.996
5	0.113	1.031	99.038	11	0.000	0.004	100.00
6	0.054	0.492	99.530				

表5 初始因子载荷值矩阵

Table 5 Component Matrix

驱动因子 Driving factor	成分 Component		驱动因子 Driving factor	成分 Component	
	F1	F2		F1	F2
人口 X_1	0.942	0.179	人均耕地面积 X_7	0.970	0.195
城镇人口比重 X_2	0.989	-0.096	万元GDP能耗 X_8	-0.996	0.007
人均GDP X_3	0.980	-0.113	农用机械总动力 X_9	0.989	-0.096
工业贡献率 X_4	-0.016	0.889	复种指数 X_{10}	-0.597	-0.510
居民消费水平 X_5	0.675	-0.315	城市建设面积 X_{11}	0.963	-0.078
耕地农用化肥折纯量 X_6	0.964	-0.045			

以生态压力指数为因变量,上述11个驱动因子为自变量,建立多元回归模型。根据SPSS中的回归标准残差图,各散点主要分布在以 e=0 为中的横带上,说明模型拟合效果效好。结果表明,东北老工业区生态安全变化是由人口、经济、资源环境、技术水平和土地利用程度共同作用的结果。

3 结论与对策

东北老工业区生态压力不断增大,呈现不可持续的发展态势,生态安全问题亟待解决。2000—2014年间,人均能值生态承载力总体上呈现下降趋势,由2000年的0.66 hm^2/人下降到2011年的0.64 hm^2/人,2012年以后有所提升,而人均能值生态足迹总体上呈现上升趋势,由200年的10.55 hm^2/人增加到2014年的19.06 hm^2/人,总体处于生态赤字状态,且生态赤字呈现增大趋势。生态压力指数较大,表明生态环境承受的压力较大,供需关系不平衡。生态足迹多样性指数变化量较小,发展能力虽呈现上升趋势,但主要是由于生态足迹的增加造成的。生态协调性指数不断降低并趋近于1,表明生态协调性已经处于不协调、不安全状态。而东北老工业区生态压力不断增大是由社会经济、人口状况、资源环境、技术水平及土地利用程度等因素共同作用

的结果,总人口、城镇人口比重、人均 GDP、人均耕地面积、耕地农用化肥折纯量、农用机械总动力和城市建设面积对东北老工业区生态安全趋于严重具有较强的驱动作用。

东北老工业区在实施"全面振兴东北"重大战略的过程中,必须加强生态文明建设,积极采取措施促进经济-社会-生态系统的协调发展,实现可持续发展。(1)转变经济发展模式,促进产业结构优化升级。改变以原材料等要素投入为主的粗放型经济发展方式向集约型经济发展方式转变,增加关键生产环节的研发投入,加快企业技术改造进程,降低能源消耗,减少"三废"等污染物排放。(2)积极推进循环经济发展,从源头控制和减少环境污染物的产生与排放,减少资源消耗、降低环境污染,实现经济效益、社会效益与环境效益的协调发展。(3)推进新型城镇化建设,提升城镇化质量。加快推进城市群建设,重点提升城市群中心城市的经济实力和综合功能,优化城市群内部格局,促进大中小城市协调发展,加强城市群的扩散效应和带动作用。探索资源型城市多元化发展路径,科学制定城市产业发展规划,提前布局资源型产业的接续替代工作,探索资源型城市的特色化发展道路。(4)加强制度建设,营造绿色文化。加强政策法规体系建设,完善科学决策和管理机制,强化监督系统,建立和完善生态环境保护责任制,使制度建设成为实现东北老工业区可持续发展的重要保障。提高居民生态环境意识,建立新的生产生活与消费理念,逐步建设成为环境友好型社会。

参考文献(References):

[1] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于3S技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.

[2] 胡秀芳, 赵军, 查书平, 鲁凤, 王晓峰. 生态安全研究的主题漂移与趋势分析. 生态学报, 2015, 35(21): 6934-6946.

[3] Su Y X, Chen X Z, Liao J X, Zhang X, Wang C J, Ye Y Y, Wang Y. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 19: 35-46.

[4] 傅伯杰, 吕一河, 高光耀. 中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展. 自然杂志, 2012, 34(5): 261-272.

[5] 王金龙, 杨伶, 李亚云, 张大红. 中国县域森林生态安全指数——基于5省15个试点县的经验数据. 生态学报, 2016, 36(20): 6636-6645.

[6] Sydelko P J, Hlohowskyj I, Majerus K, Christiansen J, Dolph J. An object-oriented framework for dynami c ecosystem modeling: application for integrated risk assessment. Science of the Total Environment, 2001, 274(1/3): 271-281.

[7] Rasul G, Thapa G B. Sustainability analysis of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh. World Development, 2003, 31(10): 1721-1741.

[8] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(50): 19703-19708.

[9] Luijten J C, Knapp E B, Jones J W. A tool for community-based assessment of the implications of development on water security in hillside watersheds. Agricultural Systems, 2001, 70(2/3): 603-622.

[10] Hodson M, Marvin S. 'Urban ecological security': a new urban paradigm? International Journal of Urban and Regional Research, 2009, 33(1): 193-215.

[11] Bhandari B S, Grant M. Analysi s of livelihood security: A case study in the Kali-Khola watershed of Nepal. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 17-26.

[12] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.

[13] 吴晓. 三峡库区重庆东段生态安全评价研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.

[14] 王根绪, 程国栋, 钱鞠. 生态安全评价研究中的若干问题. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1551-1556.

[15] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.

[16] 和春兰, 饶辉, 赵筱青. 中国生态安全评价研究进展. 云南地理环境研究, 2010, 22(3): 104-110.

[17] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态系统健康评价初探. 中国环境科学, 2002, 22(6): 525-529.

[18] 谢花林, 李波. 城市生态安全评价指标体系与评价方法研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2004, 40(5): 705-710.

[19] 杜锁军, 谢东俊, 殷益敏. 城市生态环境安全评价研究. 干旱环境监测, 2006, 20(4): 211-214.

[20] 董金玮, 郑新奇. 基于改进PSR模型的济南市生态安全评价研究. 资源开发与市场, 2007, 23(1): 1-4.

[21] Krabbenhoft D P, Sunderland E M. Global Change and Mercury. Science, 2013, 341(6153): 1457-1458.

[22] Suding K, Higgs E, Palmer M, Callicott J B, Anderson C B, Baker M, Gutrich J J, Hondula K L, LaFevor M C, Larson B M, Randall A, Ruhl J

B, Schwartz K Z S. Committing to ecological restoration. Science, 2015, 348(6235): 638-640.
[23] 杨青, 逯承鹏, 周锋, 耿涌, 景红双, 任婉侠, 薛冰. 基于能值-生态足迹模型的东北老工业基地生态安全评价——以辽宁省为例. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1594-1602.
[24] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 120-130.
[25] Rees W E, Wackernagel M, Testemale P. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriela Island: New Society Publishers, 1998.
[26] Ulgiati S, Brown M T, Bastianoni S, Marchettini N. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. Ecological Engineering, 1995, 5(4): 519-531.
[27] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method: The case study of Brazil. Ecological Indicators, 2012, 16: 113-127.
[28] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environ-mental Decision Making. New York: John Wiley, 1995.
[29] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological foot-print calculation and its application. Ecological Modelling, 2005, 185(1): 65-75.
[30] 方恺. 基于改进的生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
[31] Zhu L, Bian Z F, Zhao H, Yu J. Ecological footprint analysis in resource-exhausted cities in transformation period: A case study of Jiawang District in Xuzhou City. China Land Sciences, 2013, 27(5): 78-84.
[32] Galli A, Weinzettel J, Cranston G, Ercin E. A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a one planet economy. Science of the Total Environment, 2013, 461-462: 813-818.
[33] 何锋, 张青峰, 王力, 张宽平. 基于改进生态足迹模型的县域生态可持续评价. 农业工程学报, 2011, 27(5): 320-328.
[34] 赵先贵, 赵晶, 马彩虹, 肖玲, 马彩芳, 王晓宇. 基于足迹家族的云南省资源与环境压力评价. 生态学报, 2016, 36(12): 3714-3722.
[35] 燕子. 基于能值——生态足迹的武汉市生态安全研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
[36] Campbell E T, Brown M T. Environmental accounting of natural capital and ecosystem services for the US National Forest System. Environment, Development and Sustainability, 2012, 14(5): 691-724.
[37] 曹晶晶. 基于能值生态足迹模型的湖北省生态安全评价与预测[D]. 武汉: 湖北大学, 2012.
[38] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用——以深圳市为例. 生态学报, 2008, 28(5): 2220-2231.